

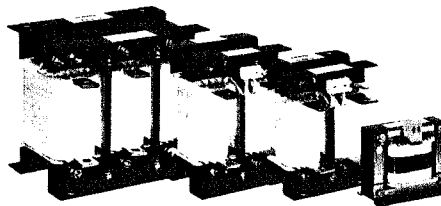
# Дроссели фирмы ELHAND TRANSFORMATORY в составе энергосберегающих преобразователей частоты

Мы продолжаем публикацию серии статей ООО «ОПТИМА» о продукции известной польской фирмы ELHAND TRANSFORMATORY (начало в №12 от 27.12.2002 г.)

В последнее десятилетие экономия электроэнергии является одним из приоритетных направлений экономической политики стран СНГ. И в этой связи на промышленных предприятиях широкое распространение получили энергосберегающие преобразователи частоты (ЭПЧ), которые используются в качестве регуляторов производительности энергетических установок (насосов, вентиляторов, компрессоров и т.п.). Для получения максимального энергосберегающего эффекта ЭПЧ необходимо оснащать сетевыми и (или) сглаживающими дросселями.

Энергетики при контактах с нами практически всегда задают одни и те же вопросы: нужно ли и в каких случаях использовать дополнительные дроссели. Настоящая статья обобщает предыдущие публикации [1—4] и опыт автора за 19 лет работы по внедрению и эксплуатации ЭПЧ на промышленных предприятиях Республики Беларусь. Тех читателей ЭМ, которые не имели возможности ознакомиться с публикациями [1—4], просим обращаться к нам. Мы с удовольствием вышлем вам статьи.

Фирма ELHAND TRANSFORMATORY, Польша изготавливает дроссели, используемые совместно с ЭПЧ. Система обеспечения качества, отвечающая требованиям нормы ISO-9002, внедренная на фирме ELHAND TRANSFORMATORY, гарантирует наивысшее качество, повторяемость технических параметров выпускаемых дросселей.



Типовая схема подключения изображена на рис. 1. В структуру системы на базе ЭПЧ, как правило, входят: сетевой ED3N, сглаживающий ED1W и моторный ED3S дроссели.

## СЕТЕВЫЕ ДРОССЕЛИ

Сетевой дроссель (ED3N) подключается к входу ЭПЧ и является двухсторонним буфером между сетью электроснабжения и ЭПЧ.

### Назначение сетевых дросселей:

1. Повышение энергосберегающего эффекта от внедрения ЭПЧ путем уве-

личения коэффициента мощности системы ЭПЧ—асинхронный двигатель (АД).

2. Подавление высших гармоник входного тока ЭПЧ, генератором которых является неуправляемый выпрямитель ЭПЧ.

3. Выравнивание линейных напряжений на входе ЭПЧ при перекосах питающего напряжения.

4. Подавление быстрых изменений напряжения на входе ЭПЧ (грозовые перенапряжения, коммутация батарей статических конденсаторов и т.п.).

5. Снижение скорости нарастания тока короткого замыкания, на выходе ЭПЧ.

### 1. Повышение энергосберегающего эффекта от внедрения ЭПЧ

При питании АД от промышленной сети его коэффициент мощности (PF) равен  $\cos \phi$  АД. Ситуация существенно ухудшается, когда питание АД осуществляется от ЭПЧ. Коэффициент мощности (PF) системы ЭПЧ—АД становится меньше  $\cos \phi$ , а это значит, что увеличивается реактивная составляющая мощности (Q, кВАр) и, как следствие, полная мощность (S, кВА), потребляемая системой ЭПЧ—АД из сети электроснабжения. Причина этого явления — это высшие гармоники тока, а именно 5<sup>я</sup>, 7<sup>я</sup>, 11<sup>я</sup>, 13<sup>я</sup>, 17<sup>я</sup>, 19<sup>я</sup> гармоники, генерируемые неуправляемым выпрямителем ЭПЧ. То есть, в сети будут циркулировать кроме токов основной частоты 50 Гц токи с частотами 250, 350, 550, 650, 850, 950 Гц. Выражения (1) и (2) иллюстрируют негативное влияние описанного явления.

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \phi_1}{U_1 \cdot I_1} = \frac{I_1}{I_1} \cdot \cos \phi_1 \quad (1)$$

$$I_1 = \sqrt{\sum_{n=1}^N I_n^2} = \sqrt{I_1^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_{11}^2 + I_{13}^2 + \dots} \quad (2)$$

Где:

PF—коэффициент мощности системы ЭПЧ—АД;

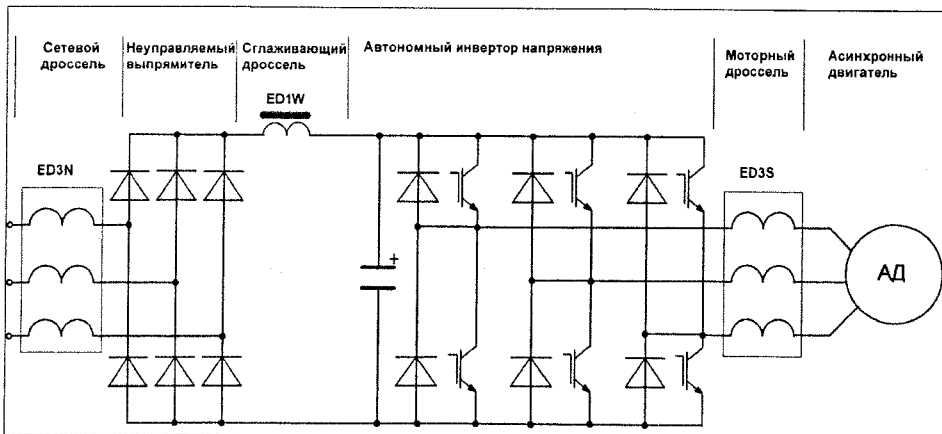


Рис. 1. Типовая схема подключения энергосберегающего преобразователя частоты, например, TOSHIBA

$P$ —активная мощность, потребляемая из сети системой ЭПЧ—АД;  
 $S$ —полная мощность, потребляемая из сети системой ЭПЧ—АД;  
 $U_1$ —действующее значение первой гармоники напряжения;  
 $I_1$ —действующее значение первой гармоники тока;  
 $\cos \varphi$ —коэффициент мощности при питании АД от промышленной сети;  
 $I_S$ —действующее значение суммарного тока;  
 $I_n$ —действующее значение  $n$ -гармоники тока.

Из формул (1,2) видно, что чем больше действующие значения высших гармоник, тем хуже коэффициент мощности.

Существенно подавляет высшие гармоники реактивное сопротивление питающей сети, основной составляющей которого является индуктивное сопротивление силового трансформатора, от которого питается система ПЧ—АД.

На рис.2 изображена обобщенная зависимость величины гармонических составляющих и суммарного входного тока системы ЭПЧ—АД от индуктивного сопротивления питающей сети, приведенного к мощности ЭПЧ.

Из рисунка видно, что при индуктивном сопротивлении 3% и более высшие гармоники подавлены в значительной степени, а действующее значение суммарного тока стремится к величине тока основной гармоники.

В случае подключения системы ЭПЧ—АД без сетевого дросселя приведенная индуктивность питающей сети находится по формуле (3).

$$X_{mp} \% = u_k \% \cdot \frac{S_{ПЧ}}{S_{mp}} \quad (3)$$

Где:  
 $X_{mp} \%$  — приведенное реактивное сопротивление трансформатора (%);  
 $u_k \%$  — напряжение короткого замыкания трансформатора (%);  
 $S_{ПЧ}$  — полная мощность преобразователя частоты, (кВА);  
 $S_{mp}$  — полная мощность трансформатора, (кВА).

Из (3) видно, что чем больше мощность питающего трансформатора, по

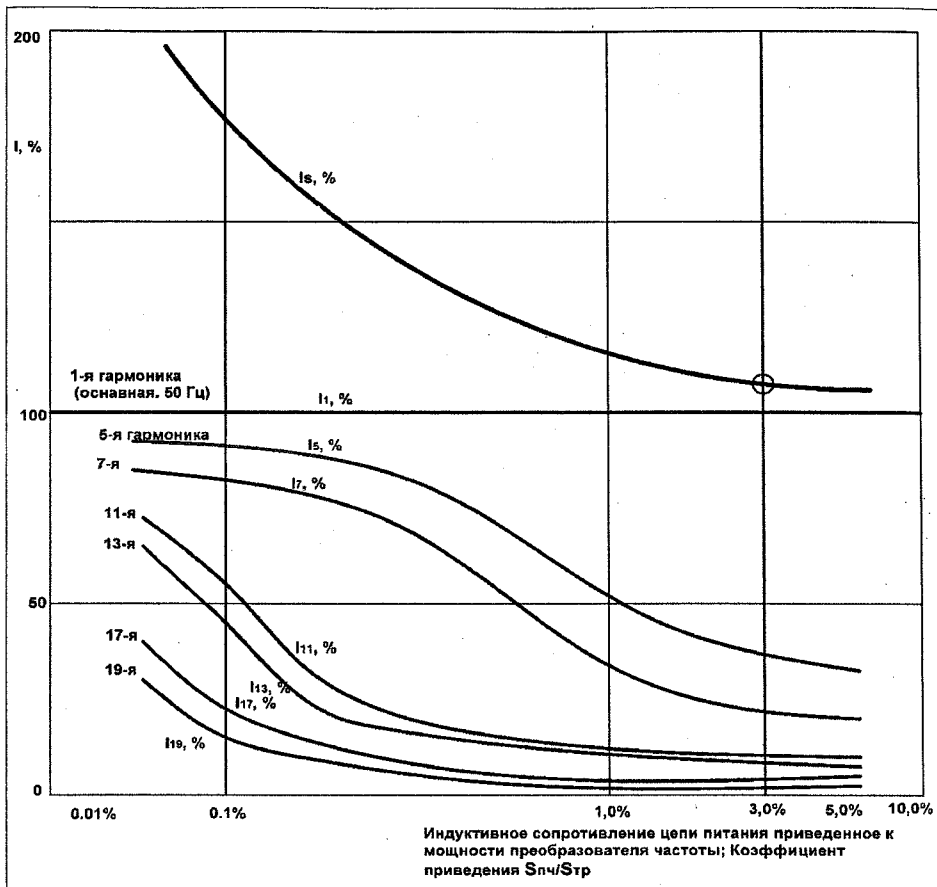


Рис.2. Зависимость суммарного тока ЭПЧ и его гармонических составляющих от индуктивного сопротивления питающей сети

сравнению с мощностью ЭПЧ, тем ниже приведенный реактанс в цепи ЭПЧ и, следовательно, тем выше амплитуды высших гармоник.

Питание систем ЭПЧ—АД, как правило, осуществляется от цеховых трансформаторных подстанций с типовыми мощностями 1000 кВА или 1600 кВА. Для оценки величины приведенного индуктивного сопротивления этих трансформаторов воспользуемся (3) с учетом того что  $u_k \%$  равно 5,05% и 5,09% соответственно для трансформаторов 1000 и 1600 кВА. Мощность ЭПЧ равна, например, 45кВт (69кВА).

$$X_{mp} \% = 0,348\%$$

— для трансформатора 1000кВА

$$X_{mp} \% = 0,22\%$$

— для трансформатора 1600кВА

Из рис.2 видно, что при таких реактансах величины высших гар-

моник имеют существенные значения и для их подавления обязательно нужно использовать сетевой дроссель.

Из последних двух выражений можно сделать вывод о том, что при несоизмеримо большой мощности источника питания системы ЭПЧ—АД реактивное сопротивление трансформатора слабо подавляет высшие гармоники. В таких схемах обязательно использование сетевых дросселей. Суммарное приведенное к мощности ЭПЧ реактивное сопротивление трансформатора и сетевого дросселя должно быть на уровне 3%. Для выполнения этого требования необходимо правильно выбрать индуктивность сетевого дросселя.

#### Расчет индуктивности сетевого дросселя

Для понимания сущности изучаемого явления обратимся к расчетной схеме, изображенной на рис.3

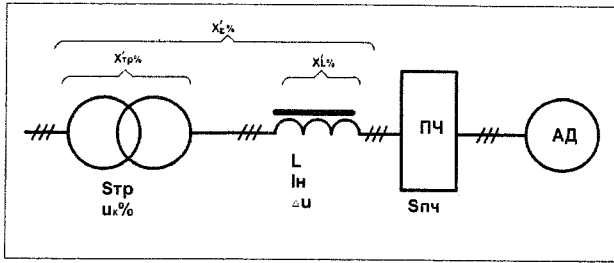


Рис.3. Расчетная схема для определения приведенного индуктивного сопротивления питающей сети

Приведенное индуктивное сопротивление трансформатора находим в соответствии с (3).

Приведенное индуктивное сопротивление сетевого дросселя найдем по (4).

$$X'_i \% = X'_s \% - X'_{тр} \% = 3 - X'_{тр} \% \quad (4)$$

Величину эквивалентной индуктивности дросселя можно рассчитать по (5)

$$L = \frac{X'_i \%}{100} \cdot \frac{\Delta U_{ин}}{\sqrt{3} I_n} \cdot \frac{1}{314} \cdot \frac{S_{ин}}{S_{ЭПЧ}} \cdot 1000 \text{ (мГн)} \quad (5)$$

где:

$L$ —индуктивность дросселя;

$\Delta U_{ин}$ —падение напряжение на индуктивном сопротивлении сетевого дросселя при номинальном токе ( $3-5\% U_n$ );

$I_n$ —Номинальный ток ЭПЧ.

Падение напряжения на дросселе рекомендуется выбирать: для нормальных сетей 3%; для жестких—5%. На основании приведенной выше методики выбора индуктивности сетевого дросселя построены нижеследующие диаграммы (рис.4 и рис. 5).

Из рис. 4. видно, что требуемая индуктивность сетевого дросселя существенно изменяется в зависимости от мощности трансформатора.

Для иллюстрации негативного влияния высших гармоник рассмотрим конкретный пример подключения системы ЭПЧ—АД к промышленной сети.

Исходные данные:

Преобразователь частоты—VFS9-2037PM, Toshiba,  $S_{ЭПЧ}$ —6.7 кВА,  $P$ —3.7кВт,  $I_n$ —16.5 А;

Асинхронный двигатель 3,7 кВт, 2-пары полюсов,  $\cos \phi$ —0.85;

Трансформатор— $S_{тр}$ —800кВА,  $X_k$ —5%,  $U_n$ —200В.

Сравниваются два варианта подключения системы ЭПЧ—АД: а) без сете-

вого дросселя; б) с сетевым дросселем. Результаты сравнения сведены в таблице 1. При расчетах были использованы выражения (1) и (2)

**Вывод:**

1. Входной ток системы ЭПЧ—АД без сетевого дросселя вырос на 52% по сравнению с номинальным током АД при питании его от промышленной сети.

2. Коэффициент мощности системы ЭПЧ—АД без сетевого дросселя снизился на 34% по сравнению с  $\cos \phi$  АД.

3. Входной ток системы ЭПЧ—АД с сетевым дросселем вырос на 4,2% по сравнению с номинальным током АД при питании его от промышленной сети.

4. Коэффициент мощности системы ЭПЧ—АД с сетевым дросселем снизился на 3,5%.

5. Сетевой дроссель хорошо корректирует коэффициент мощности системы ЭПЧ—АД и снижает суммарный ток, потребляемый из сети электропитания за счет снижения реактивной составляющей.

**2. Подавление высших гармоник входного тока ЭПЧ**

Подавление высших гармонических составляющих входного тока системы ЭПЧ—АД важно еще и потому, что высшие гармоники тока искажают синусоиду питающего напряжения, приводя к появлению высших гармонических напряжения. В результате этого в обмотках статоров АД, в батареях статических конденсаторов, в кабельных сетях циркулируют токи высших гармонических, приводя к дополнительным потерям, вызывая их дополнительный нагрев и снижение срока службы. Понятно, что чем больше мощность ЭПЧ, тем существеннее искажение синусоиды напряжения и тем более негативное влияние на систему электропитания оказывают высшие гармоники. Кроме того, высшие гармоники могут вводить в проработку вторичные электронные приборы.

**3. Выравнивание линейных напряжений на входе ЭПЧ при перекосах питающего напряжения**

При перекосах фаз питающего напряжения, вызванного неравномерно-

Таблица 1.

Параметр	Ток системы, $I_s$ , %	Коэффициент мощности PF
1 Прямое подключение АД (3.7 кВт) к сети электропитания	100	0,85
2 Система ПЧ—АД без сетевого дросселя	152	0,56
3 Система ПЧ—АД с сетевым дросселем ( $L=2.4$ мГ.)	104,2	0,82

Рис.4.

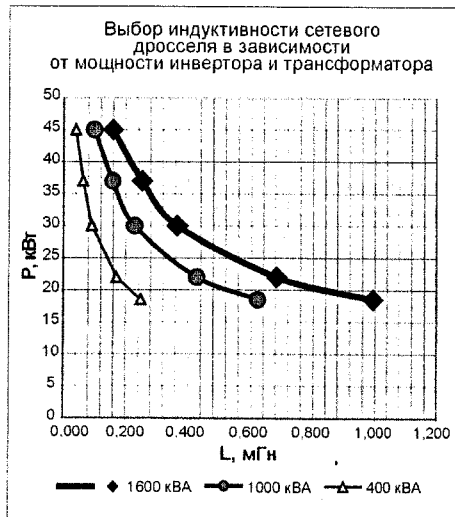
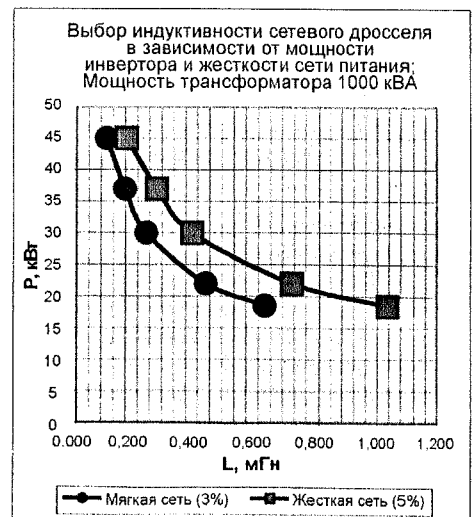


Рис.5.



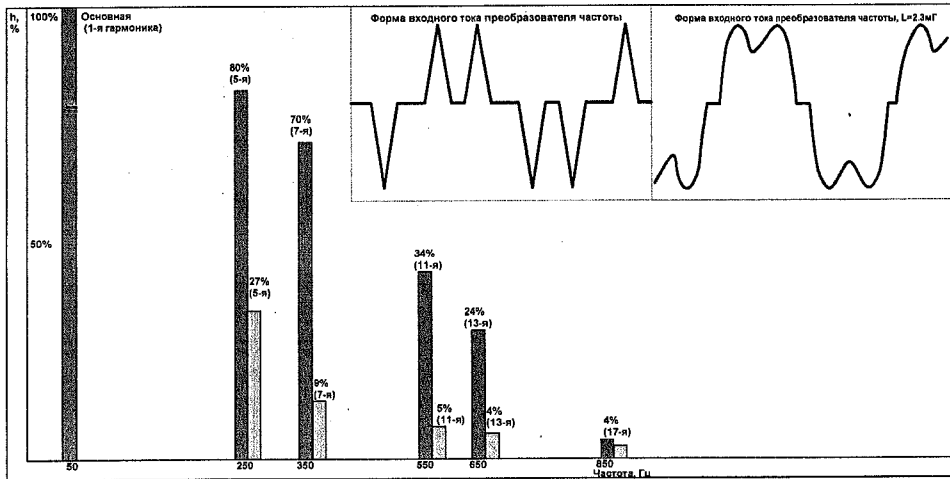


Рис. 6. Гармонический спектр и форма тока на входе ПЧ частоты типа VF S9-2037-PM (3.7 kW), TOSHIBA, без сетевого дросселя и с сетевым дросселем ED3N-2.3/18 (2.3 мГ)

стью нагрузки, подключенной к разным фазам, использование сетевого дросселя приводит к выравниванию линейных напряжений на входе ЭПЧ. Это объясняется тем, что большие линейные напряжения приводят к большим падениям напряжения на реактивном сопротивлении сетевого дросселя и, соответственно, меньшие линейные напряжения вызывают меньшие падения напряжения. В результате трехфазная система напряжений выравнивается. Перекосы напряжения по фазам вызывают увеличение токов через диоды неуправляемого выпрямителя ЭПЧ, что может привести к их выходу из строя.

#### 4. Подавление быстрых изменений напряжения на входе ЭПЧ

Быстрые изменения напряжения на входе ЭПЧ, происходящие, например, при грозовых перенапряжениях, коммутациях батарей статических конденсаторов и т.п., приводят к кратковременному увеличению токов через диоды неуправляемого выпрямителя ЭПЧ (рис. 1). Это вызвано свойством конденсаторов в промежуточном контуре постоянного тока ЭПЧ. При скачкообразном увеличении напряжения на входе ЭПЧ напряжение на конденсаторе увеличивается по экспоненциальному закону, а скорость нарастания тока через диоды ограничивается только собственной индуктивностью питающей сети, и при определенных уровнях перенапряжения всплески тока становятся выше критической величины для диода, который выходит из строя.

#### 5. Снижение скорости нарастания тока короткого замыкания на выходе ЭПЧ

При внезапных коротких замыканиях на выходе ЭПЧ скорость нарастания тока через диоды выпрямителя и транзисторы инвертора ограничивается реактансом питающей сети, и чем он больше, тем выше вероятность успешного срабатывания электронной токовой защиты ЭПЧ. Реактанс питающей сети увеличивается последовательным включением сетевых и сглаживающих дросселей.

#### ВЫВОДЫ:

1. Правильный выбор индуктивности сетевого дросселя в составе энергосберегающего ЭПЧ позволяет более полно использовать энергосберегающие свойства ЭПЧ, работающего в качестве регулятора производительности насоса, вентилятора и других механизмов с вентиляторной механической

характеристикой в функции заданного технологического параметра, например, давления.

2. Сетевой дроссель защищает сеть электроснабжения от высших гармоник, генератором которых является неуправляемый выпрямитель ЭПЧ.

3. Сетевой дроссель защищает сам ЭПЧ от: всплесков напряжения в сети электроснабжения; перекосов линейных напряжений питающей сети.

4. Избежать дороговизны «фирменного» сетевого дросселя можно приобретя дроссель с аналогичными характеристиками произведенный фирмой ELHAND.

#### СГЛАЖИВАЮЩИЕ ДРОССЕЛИ

##### Назначение сглаживающих дросселей

1. Уменьшение пульсаций выпрямленного напряжения и тока на выходе выпрямителя.

2. Повышение энергосберегающего эффекта от внедрения ЭПЧ путем увеличения коэффициента мощности системы ЭПЧ—асинхронный двигатель (АД).

3. Подавление высших гармоник входного тока ЭПЧ, генератором которых является неуправляемый выпрямитель ЭПЧ.

4. Снижение скорости нарастания тока короткого замыкания на выходе ЭПЧ.

##### 1. Уменьшение пульсаций выпрямленного напряжения и тока на выходе выпрямителя

В цепи нагрузки любой схемы выпрямителя формируется выходное напряжение, образуемое суммой двух составляющих: постоянной и переменной. Чтобы ограничить переменную составляющую выходного напряжения,

Таблица 2.

Метод определения гармоник	Уровень гармоник по отношению к первой (%)							
	5я гармоника	7я гармоника	11я гармоника	13я гармоника	17я гармоника	19я гармоника	23я гармоника	25я гармоника
Без Дросселей	65	41	8,5	7,7	4,3	3,1	2,6	1,8
АС-Дроссель	38	14,5	7,4	3,4	3,2	1,9	1,7	1,3
ДС-Дроссель	30	13	8,4	5	4,7	3,2	3,0	2,2
АС-Дроссель и ДС-Дроссель	28	9,1	7,2	4,1	3,2	2,4	1,6	1,4

между выходом выпрямителя и входом инвертора включают емкостной фильтр, состоящий из электролитического конденсатора большой емкости, или однозвенный Г-образный LC-фильтр, состоящий из сглаживающего дросселя и конденсатора (рис.1).

Эффективность сглаживающего фильтра оценивают по его способности уменьшать пульсацию, т.е. по значению коэффициента сглаживания  $S_c$ . Чем меньше коэффициент сглаживания, тем выше эффективность фильтра. Для однозвенного Г-образного LC-фильтра коэффициент сглаживания можно рассчитать по формуле

$$s_c = \omega_1 L_d C - 1 \quad (6)$$

Требование к коэффициенту сглаживания фильтра является основным при проектировании.

## 2. Повышение энергосберегающего эффекта от внедрения ЭПЧ путем увеличения коэффициента мощности системы ЭПЧ—асинхронный двигатель (АД); подавление высших гармоник входного тока ЭПЧ, генератором которых является неуправляемый выпрямитель ЭПЧ; снижение скорости нарастания тока короткого замыкания на выходе ЭПЧ

Принцип действия сглаживающего дросселя в этом качестве аналогичен действию сетевого дросселя и рассмотрен выше.

Сглаживающий дроссель ED1W более эффективно подавляет 5-ю и 7-ю гармоники, а сетевой дроссель ED3N—11-ю и выше. Поэтому оптимальный результат достигается в случае совместного использования сетевого и сглаживающего дросселей. Типовая иллюстрация этого факта отбрасана в таблице.

## МОТОРНЫЕ ДРОССЕЛИ

Выходное напряжение ЭПЧ — это последовательность прямоугольных импульсов регулируемой ширины и частоты. Скорость нарастания импульсов напряжения очень велика, что представляет опасность для изоляции питаемых АД. Ограничение скорости нарастания напряжения, а в результате снижение риска повреждения изоляции двигателя, достигается путем уста-

новки между двигателем и ЭПЧ моторного дросселя типа ED3S (рис.1).

Моторные дроссели ED3S используются также для ограничения тока короткого замыкания до момента срабатывания защиты и выключения тока в цепи. Зачастую подбор соответствующей индуктивности моторного дросселя является единственной возможностью защиты выходных транзисторов. Подбор индуктивности моторного дросселя ED3S зависит от максимальной величины тока короткого замыкания в цепи.

На практике часто двигатель значительно удален от ЭПЧ. Длинный кабель обладает большими емкостями, которые способствуют увеличению потерь мощности в ЭПЧ и кабеле. Моторный дроссель ED3S, кроме защиты изоляции двигателя, компенсирует емкость питающей линии, а также ограничивает гармоники и коммутационные перенапряжения в цепи АД. В результате двигатель меньше греется.

## ВЫВОДЫ:

1. Правильный выбор индуктивности сетевого дросселя в составе энергосберегающего преобразователя частоты (ЭПЧ) позволяет более полно использовать энергосберегающие свойства ПЧ, работающего в качестве регулятора производительности насоса, вентилятора и других механизмов с вентиляторной механической характеристикой в функции заданного технологического параметра, например, давления.

2. Сетевой дроссель защищает сеть электроснабжения от высших гармоник, генератором которых является неуправляемый выпрямитель энергосберегающего преобразователя частоты.

3. Сетевой дроссель защищает сам преобразователь частоты от: всплесков напряжения в сети электроснабжения; перекосов линейных напряжений питающей сети.

4. Сглаживающий дроссель целесообразно использовать совместно с сетевым дросселем для преобразователей частоты мощностью более 55 кВт.

5. Моторные дроссели необходимо использовать при длинных кабельных линиях или высокой вероятности короткого замыкания на выходе преобразователя частоты.

6. Дроссели фирмы ELHAND экономически выгодная альтернатива «фирменным» дросселям.

## Список используемых источников:

1. Электромагазин, Минск, №4 (25) от 25 апреля 2003 г., с.15;
2. Электромагазин, Минск, №9 (18) от 25 сентября 2002 г., с.25;
3. Электромагазин, Минск, №3 (24) от 25 марта 2003 г., с.17;
4. Новости приводной техники, Москва, №6 (26) июнь 2003;
5. Toshiba inverter VF-P7 series. Instruction manual. Tokyo 105-8001, Japan.
6. Hitachi inverter L300P series. Instruction manual. Tokyo, Japan.
7. Hitachi inverter. Technical guide book. Tokyo, Japan.
8. Mitsubishi transistorized inverter FR-E500. Instruction manual. Japan.
9. Omron 3G3FV/HV - CE inverters. Instruction manual. Japan.



Директор ООО «Оптима»,  
Кандидат технических наук  
МОРОЗОВ И.М.

Инженер-конструктор фирмы  
ELHAND TRANSFORMATORY

Мирослав Лукевски  
ELHAND TRANSFORMATORY

PL 42-700 Lubliniec, ul. PCK 22  
Тел. +48 (34) 353 17 10  
(34) 351 32 20

Факс. +48 (34) 356 40 03

e-mail: info@elhand.com.pl

http://www.elhand.com.pl

ООО «Оптима»

исключительный представитель  
фирмы ELHAND

TRANSFORMATORY, Польша

на территории Республики Беларусь  
и Российской Федерации

Официальный дистрибьютор  
фирмы TOSHIBA

Ленина, 45А, оф. 201-204,

г. Светлогорск, Гомельская обл.,

Республика Беларусь, 247400,

Тел/факс: +375(0)2342 4-60-00,

4-12-79, 5-17-66, 5-13-41

Бюро в г. Минске:

моб. тел. 8(029)665-89-03

optima@mail.gomel.by www.optima.by